



Atécopol

Les enjeux de l'énergie et la situation des EnR

Vincent.Gerbaud@ensiacet.fr

Directeur de recherche CNRS au Laboratoire de génie chimique (Toulouse)

Membre de l'Atécopol

23 mars 2023

Conseil National de la Refondation – Energies Renouvelables – Aveyron



<https://atecopol.hypotheses.org/>

<https://lgc.cnrs.fr/annuaire/vincent-gerbaud/>



Université
de Toulouse

L'énergie, une grandeur thermodynamique

L'énergie se consomme et se dissipe en se transformant en travail

Pourquoi et pour quoi dépenser de l'énergie ?

- L'énergie est une grandeur physique liée au travail par le 1^{er} principe de la thermodynamique

$$\Delta \text{Energie}_{\text{systeme fermé}} = (\text{travail}) + (\text{chaleur reçue})$$

$$\Delta U = W + Q$$

- Les machines thermiques consomment de l'énergie pour fournir un travail

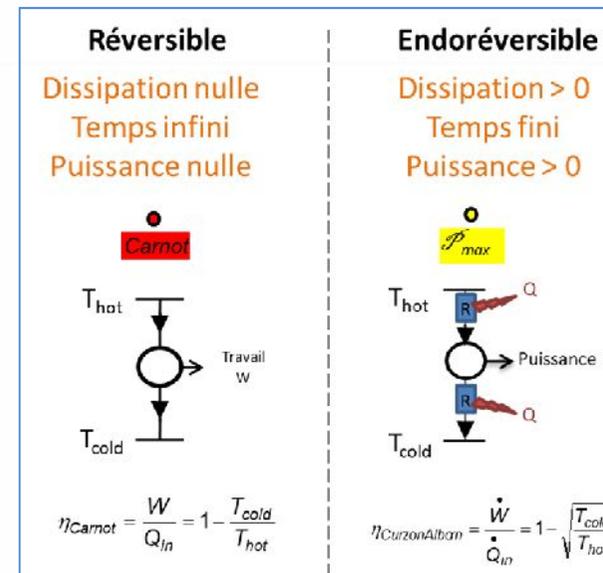
ex. une pompe à chaleur



ex. un moteur



ex. un frigo



- L'énergie se dissipe

- Le 2nd principe de la thermodynamique : production d'entropie $dS_{int} > 0$

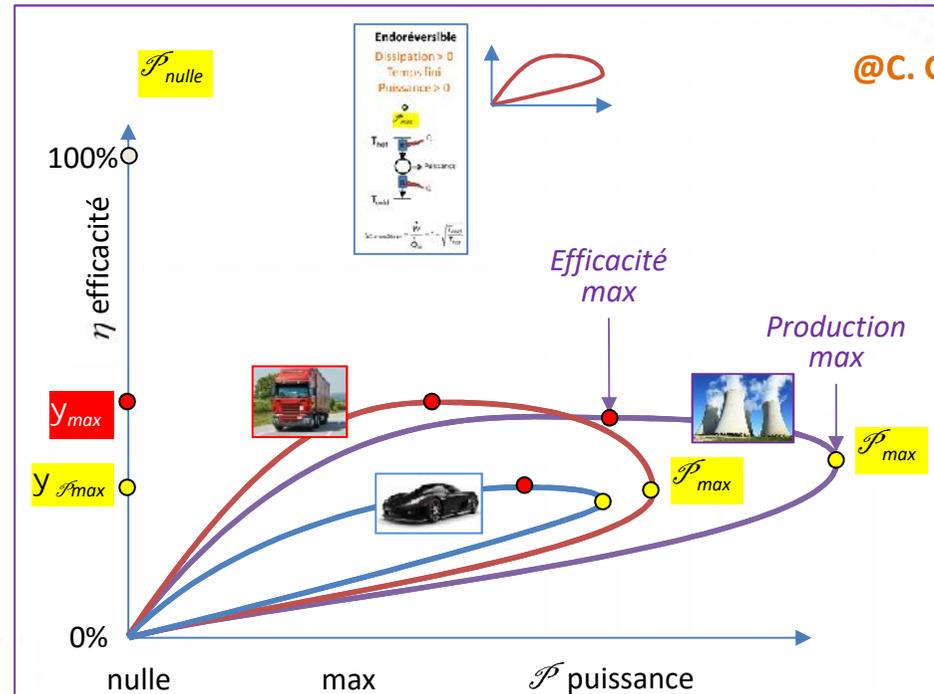
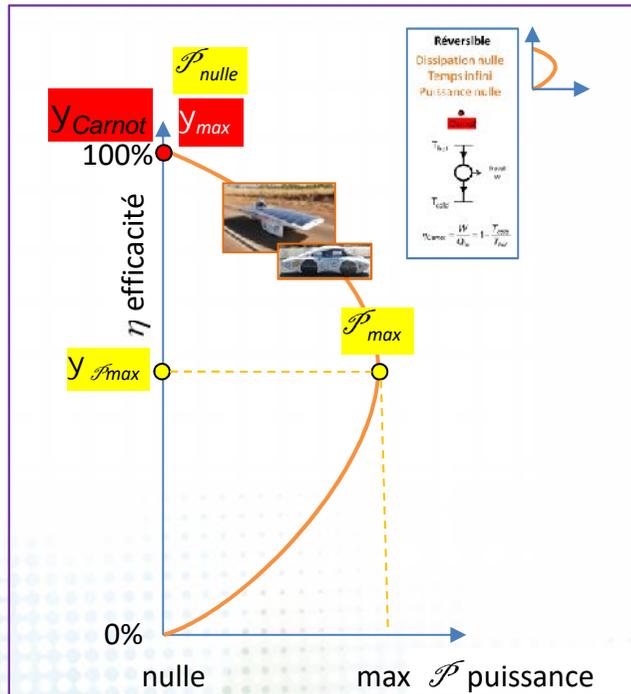
pas de puissance motrice sans dissipation irréversible d'énergie

Pourquoi et pour quoi dépenser de l'énergie ?

- pas de puissance motrice sans dissipation irréversible



@C. Goupil (LIED)



**Plus de puissance ?
= moins d'efficacité et
plus de dissipation d'énergie**

vs

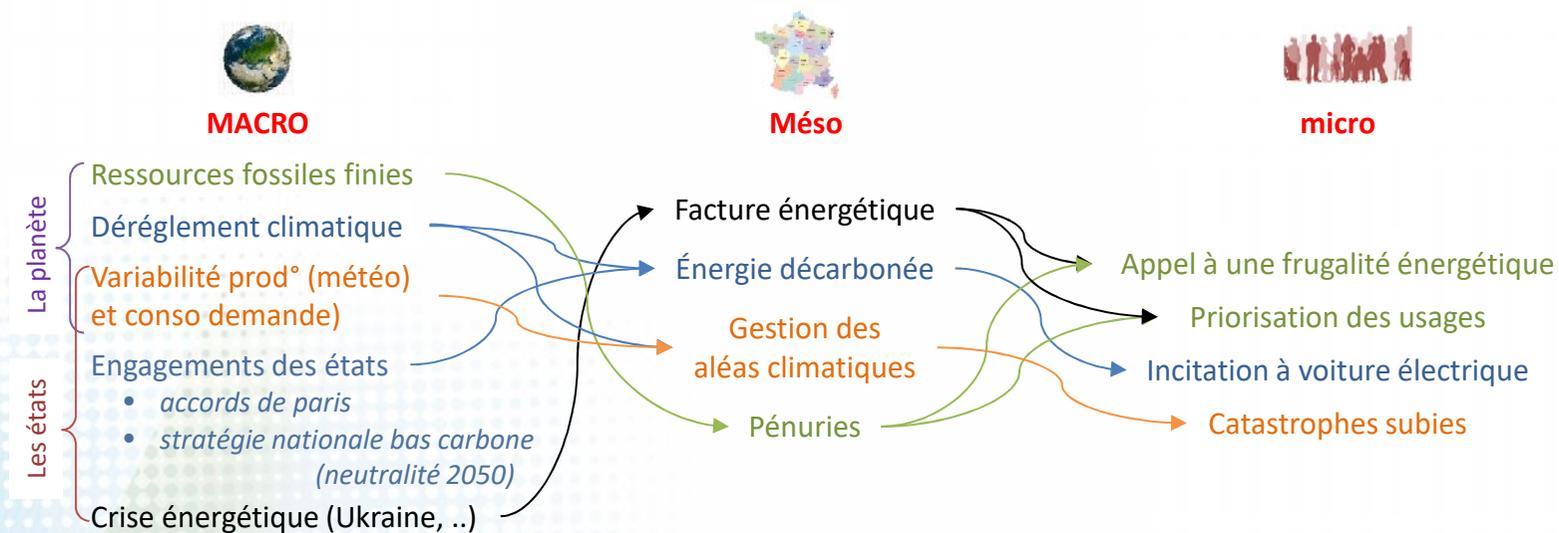
**Plus d'efficacité ?
= moins de flexibilité**

Le contexte global

Un peu d'explications et de contexte

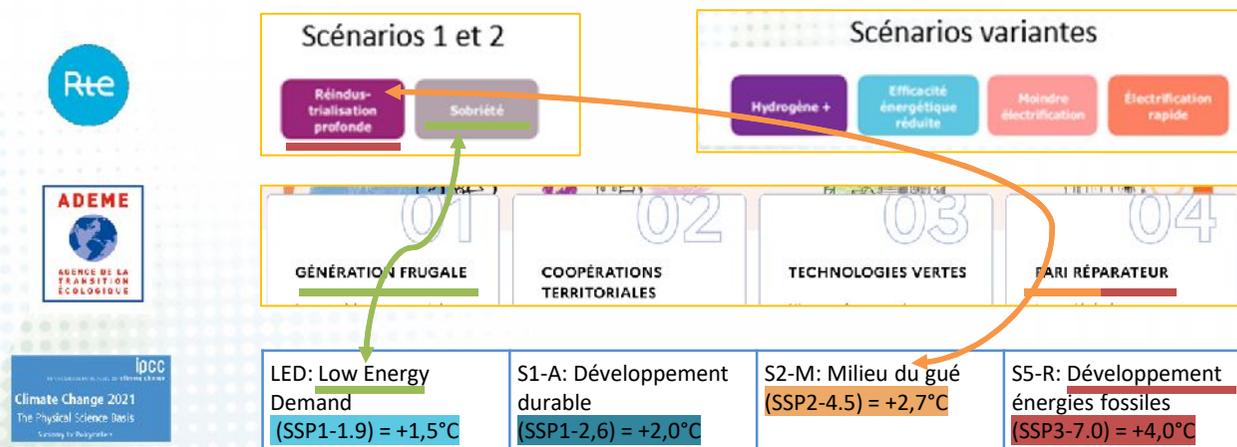
Prenons un peu de hauteur face à l'énergie

- L'énergie est présente à toutes les échelles et à tout instant



Prenons un peu de hauteur face à l'énergie

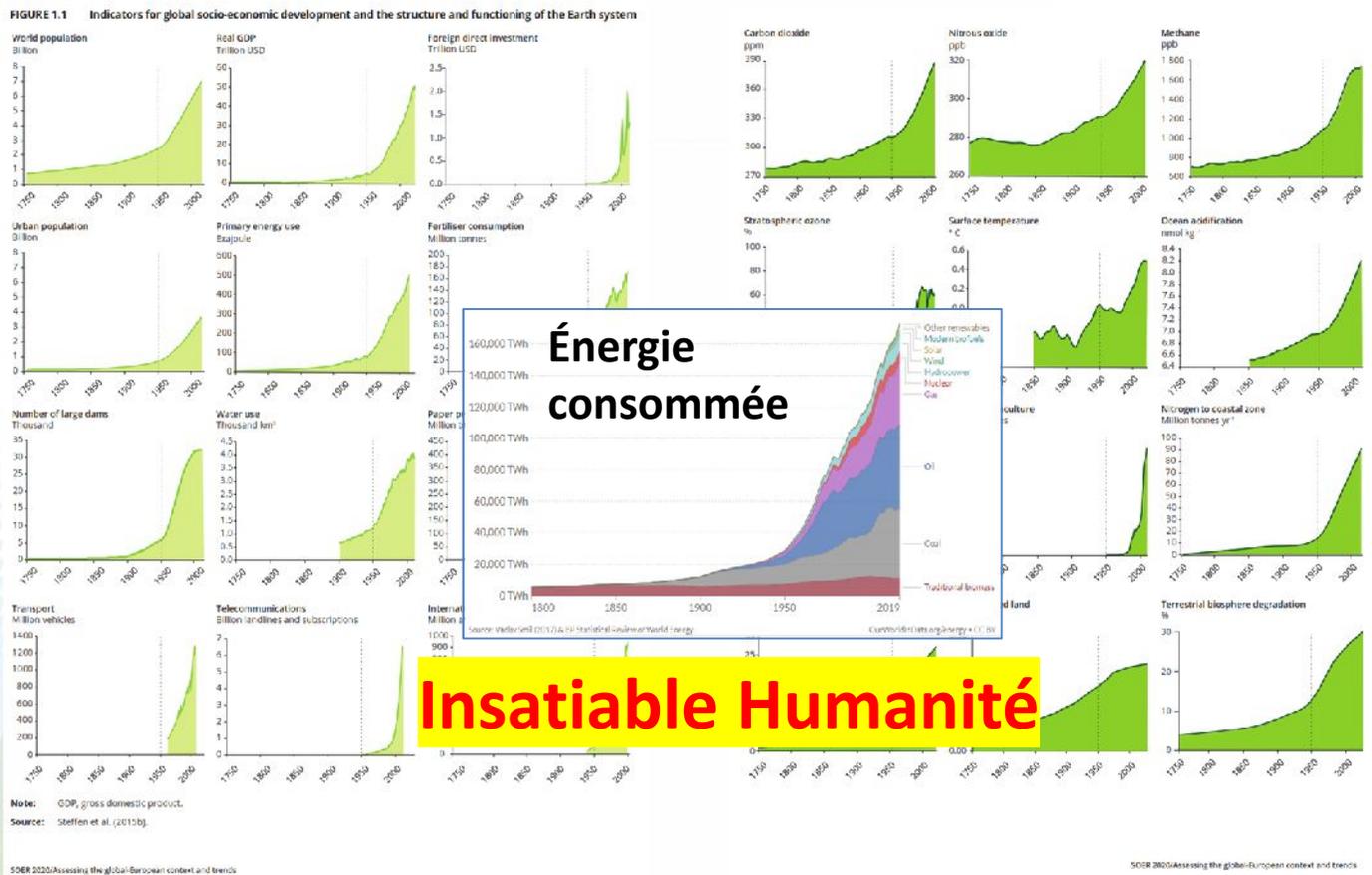
- **L'énergie est le carburant de nos modes de vie**
 - Face aux crises, les scénarios du futur vont bouleverser nos modes de vie



**nos modes de vie en transitions
et nos choix de société à débattre**

Insatiable Humanité

- La croissance exponentielle de nos modes de vie
 - des indicateurs de développement socio-économiques
 - des marqueurs du système Terre



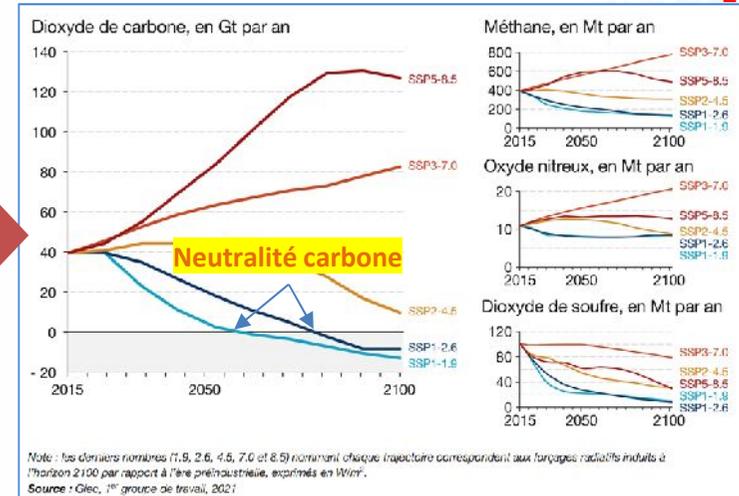
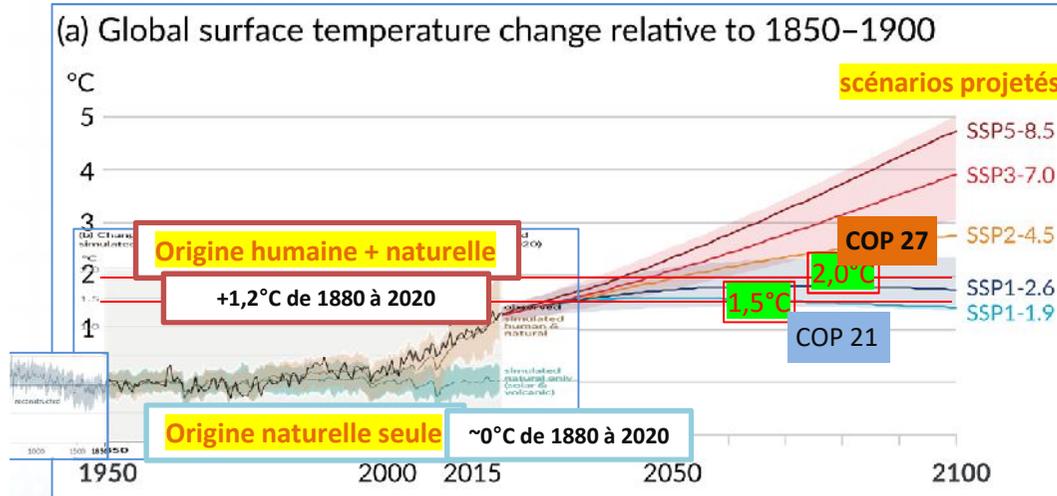
<https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020-executive-summary>

Dérèglement climatique

- Un dérèglement sur le long terme causé par les activités humaines

Global

via les émissions de CO₂



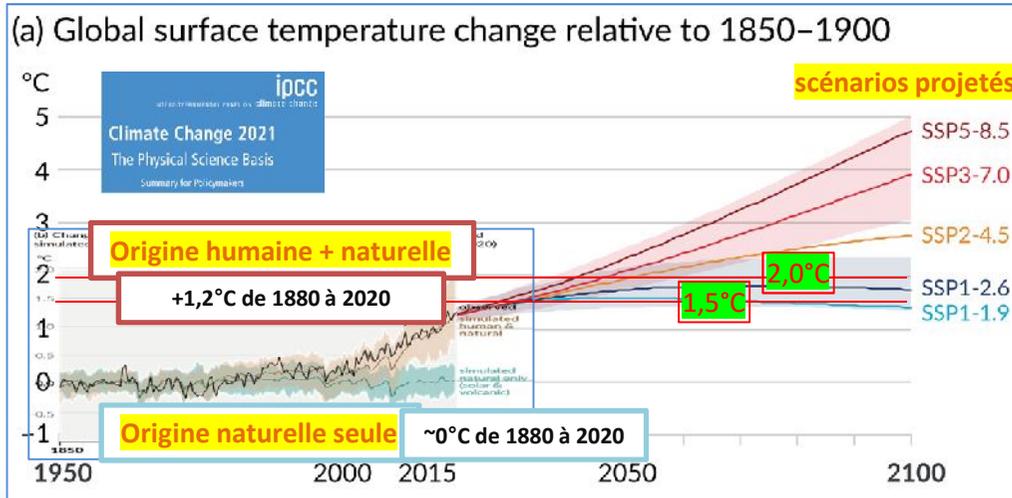
© GIEC :
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf



Dérèglement climatique

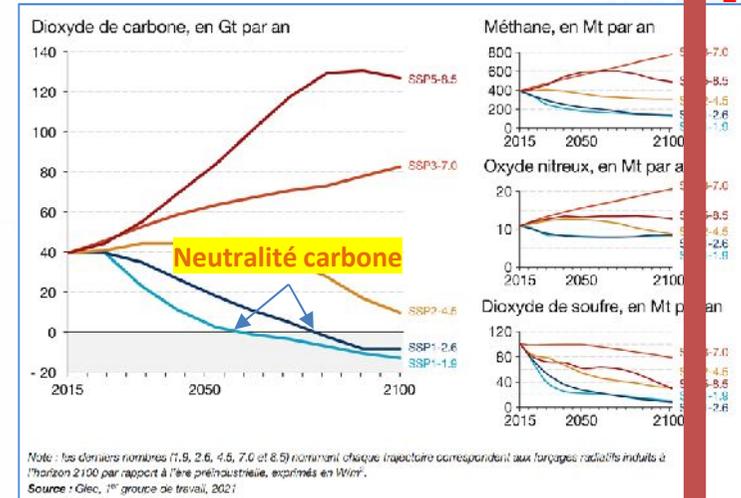
- Un dérèglement sur le long terme causé par les activités humaines

Global

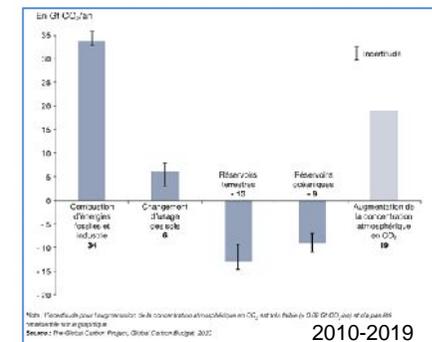


© GIEC : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

via les émissions de CO₂



d'origine énergie fossile



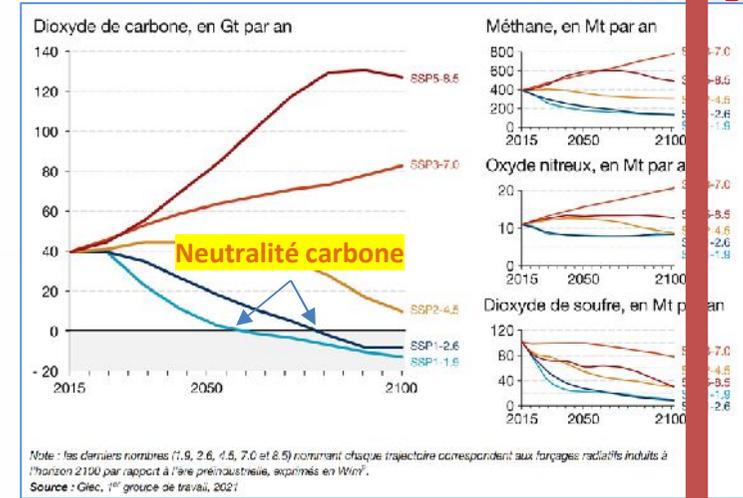
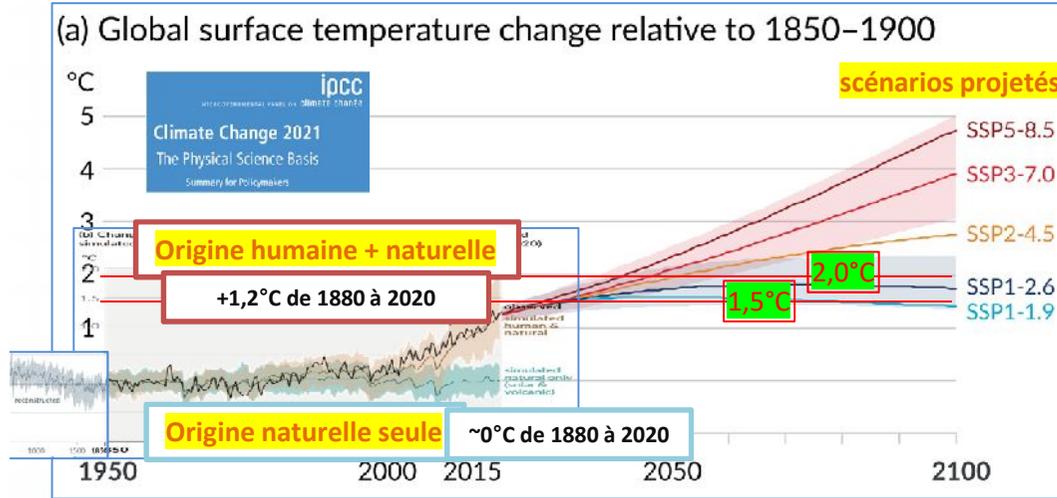
Flux annuels nets de CO₂ d'origine anthropique

Dérèglement climatique

- Un dérèglement sur le long terme causé par les activités humaines

Global

via les émissions de CO₂

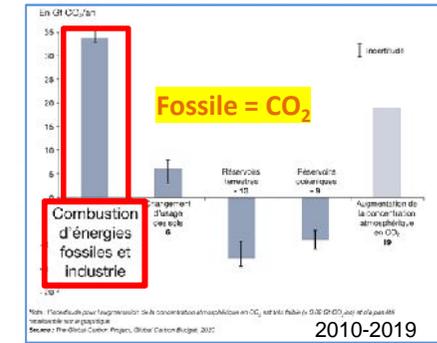
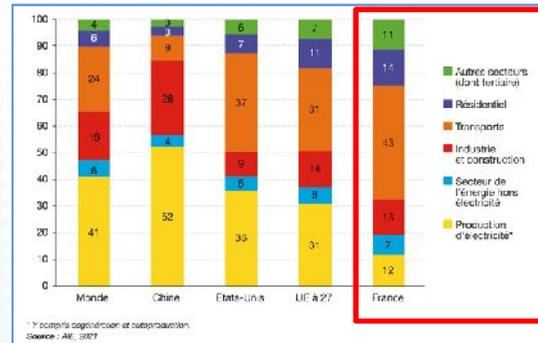
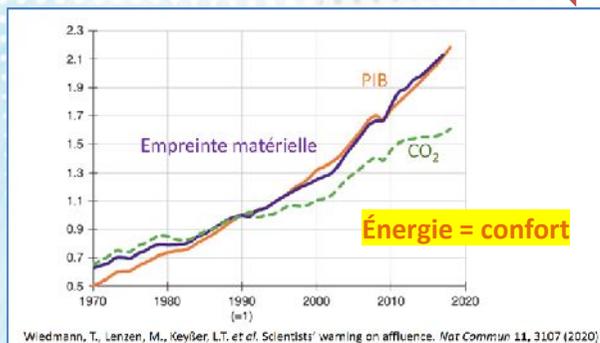


© GIEC : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

Et notre confort

Pour des usages du quotidien

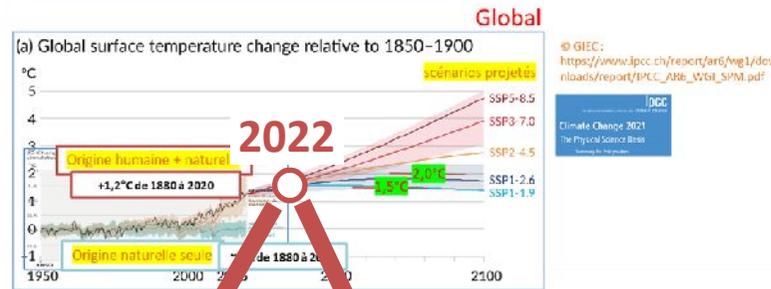
d'origine énergie fossile



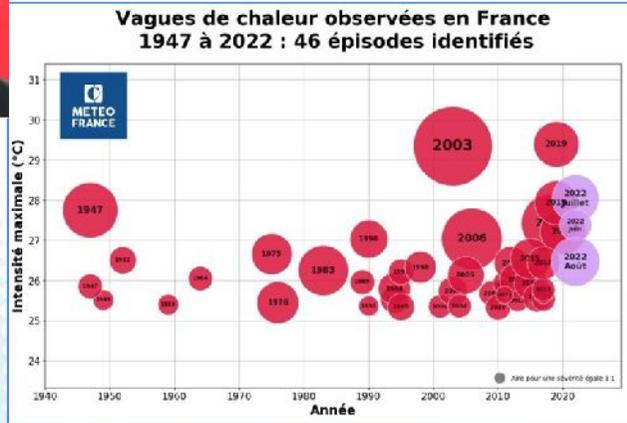
Émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie en 2019 Flux annuels nets de CO₂ d'origine anthropique

Dérèglement climatique

- Des conséquences au quotidien



@MeteoFrance & Christophe Cassou (CNRS / GIEC) **Local**



Plus de vagues de chaleur

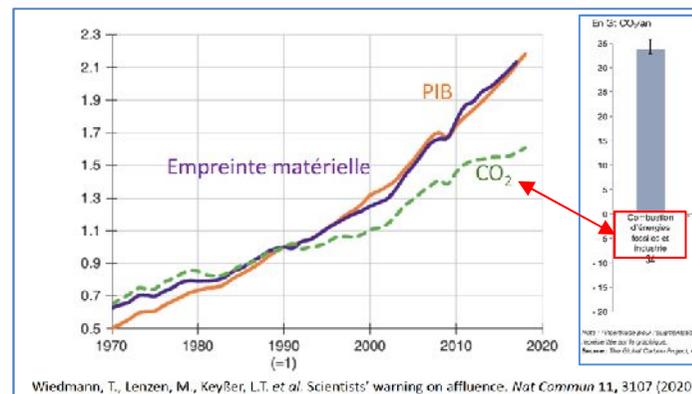
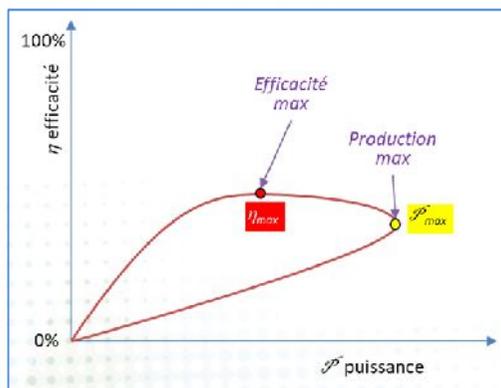
Global

@ Christophe Cassou (CNRS / GIEC)



Plus d'événements extrêmes

- ✓ On a besoin d'énergie pour nos modes de vie
- ✓ L'énergie fossile dérègle le climat



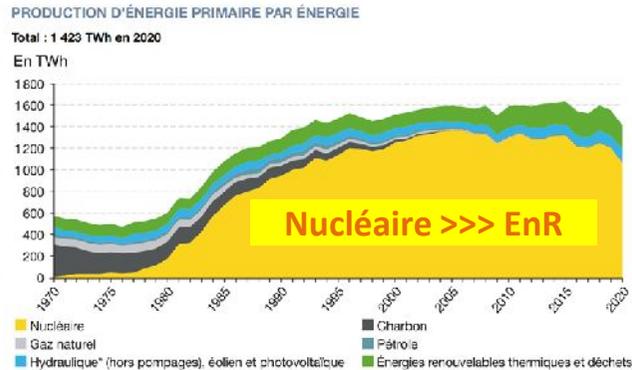
Et l'énergie aujourd'hui ?

Production d'énergie

- **Énergie Primaire en France**

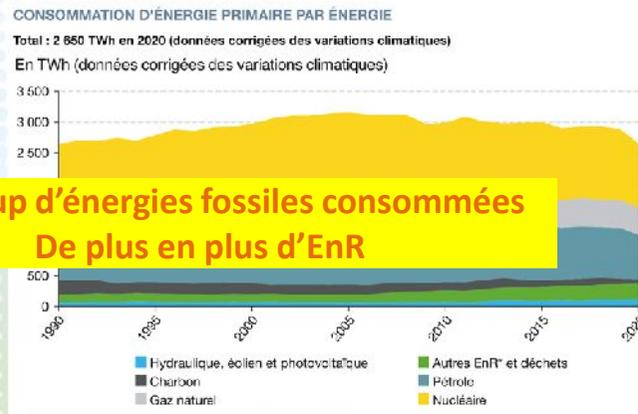
» **Prod – Conso = - 45% déficit**

– (2020): production 1423 TWh



– (2020): conso 2571 TWh (cvs)

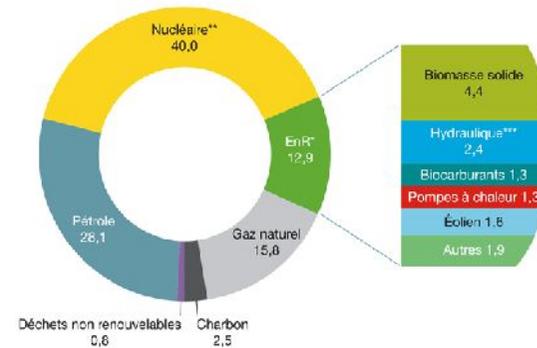
- Baisse depuis 2005



RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN FRANCE

Total : 2 571 TWh en 2020 (données non corrigées des variations climatiques)

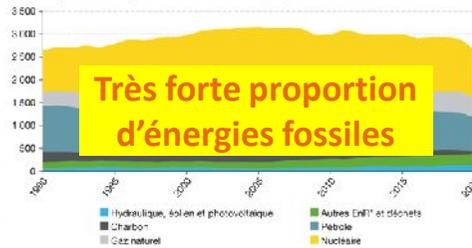
En % (données non corrigées des variations climatiques)



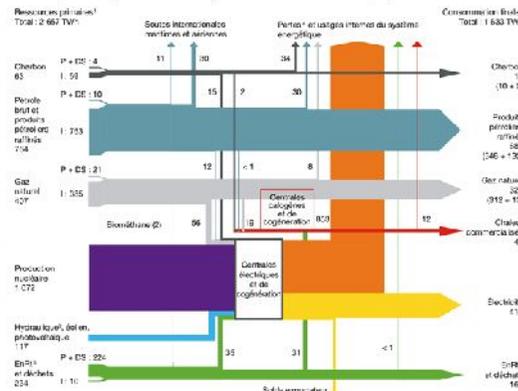
Production d'énergie

- De l'énergie primaire à l'énergie finale et ses usages

CONSUMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE
 Total : 2 660 TWh en 2020 (données corrigées des variations climatiques)
 En TWh (données corrigées des variations climatiques)



ENSEMBLE DES ÉNERGIES - BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA FRANCE
 En TWh, en 2020 (données non corrigées des variations climatiques)

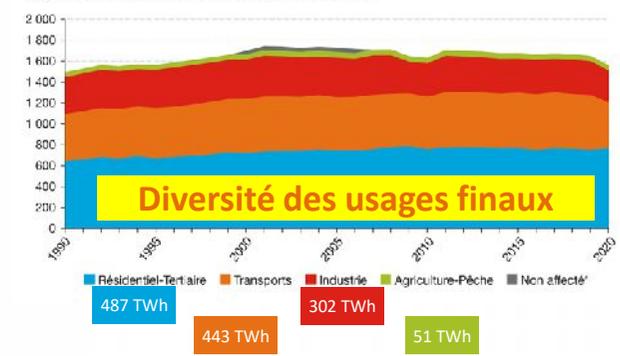


Note : le diagramme de Sankey figurent la répartition des flux énergétiques, selon les secteurs par type de consommation, les transformations, les pertes, et les flux de chaleur, proportionnelle à la quantité d'énergie.

■ Ressources primaires
 ■ Pertes irréversibles
 ■ Consommation finale

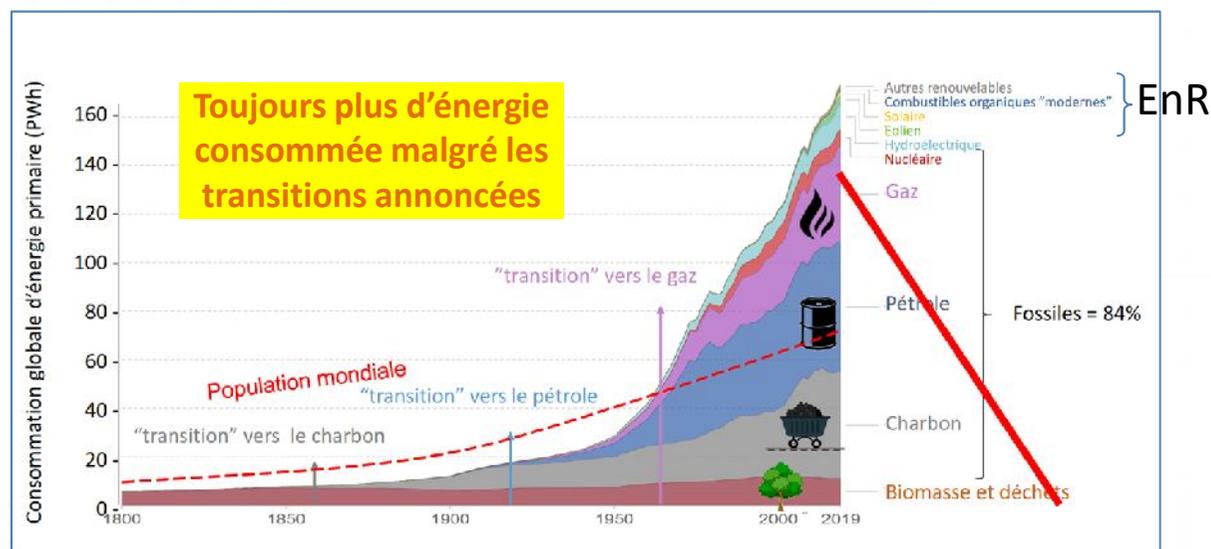
MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
 DATA LAB
 Chiffres clés de l'énergie
 ÉDITION 2021

CONSUMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR SECTEUR
 Total : 1 562 TWh en 2020 (données corrigées des variations climatiques)
 En TWh (données corrigées des variations climatiques)



Mythes et réalités

- **Mythe:**
 - Les transitions énergétiques n’existent pas

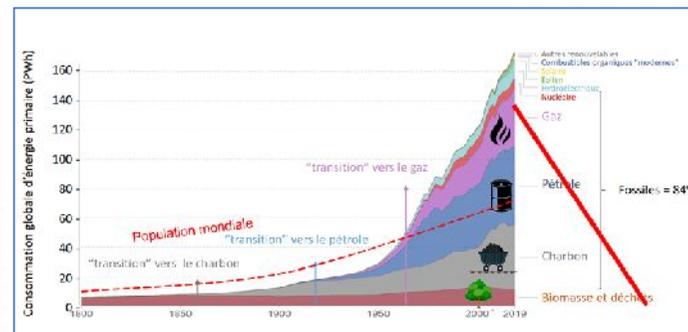
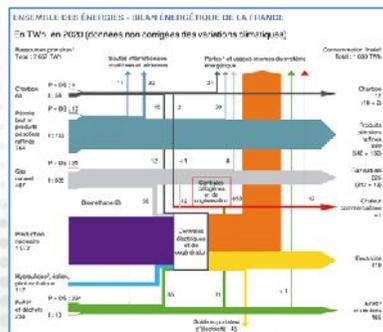


- **Réalité :**
 - Pour réduire notre dépendance aux énergies fossiles, les énergies renouvelables sont indispensables
 - ... mais elles ne peuvent pas remplacer les énergies fossiles

accord de Paris = **nécessité de réduire la consommation totale d'énergie !**
= **nécessité de modifier nos modes de vies !**

**Frugalité
énergétique
incontournable**

- ✓ Variété des moyens de production d'énergie
- ✓ Variété des usages
- ✓ Nécessaire dissipation d'énergie
- ✓ Le mythe de la transition énergétique incite à la sobriété



Les EnR plus en détail

Production d'énergie

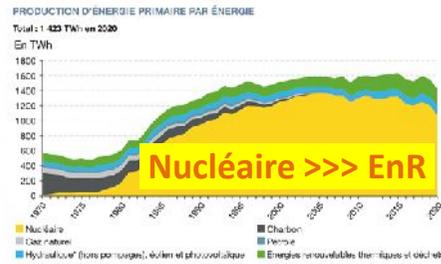
- **Energie Primaire en France**

» *Prod – Conso = - 45% déficit*

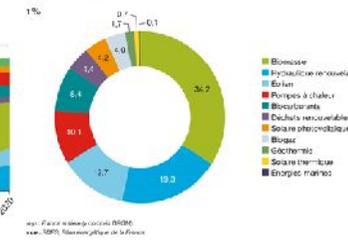
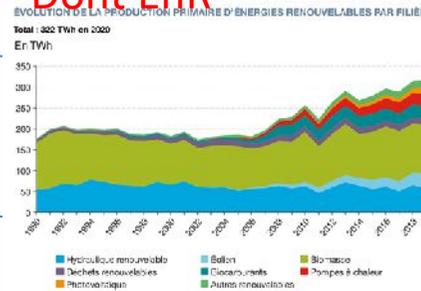
– (2020): production 1423 TWh



Chiffres clés de l'énergie
ÉDITION 2021



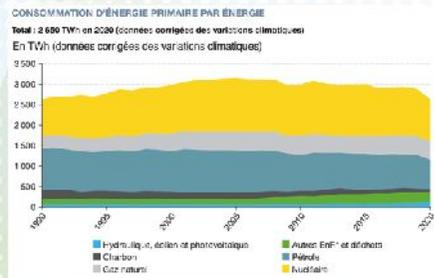
Dont EnR



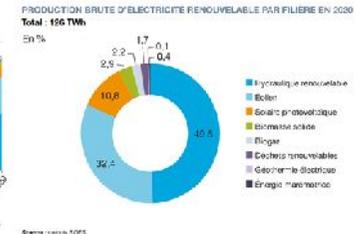
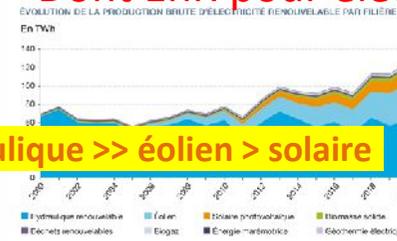
**Bois énergie >
hydro >
éolien >
solaire >
PAC > etc...**

– (2020): conso 2571 TWh (cvs)

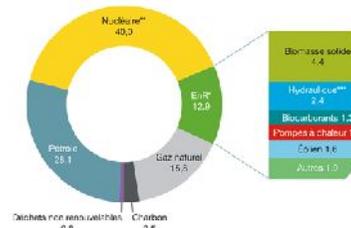
- Baisse depuis 2005



Dont EnR pour électricité



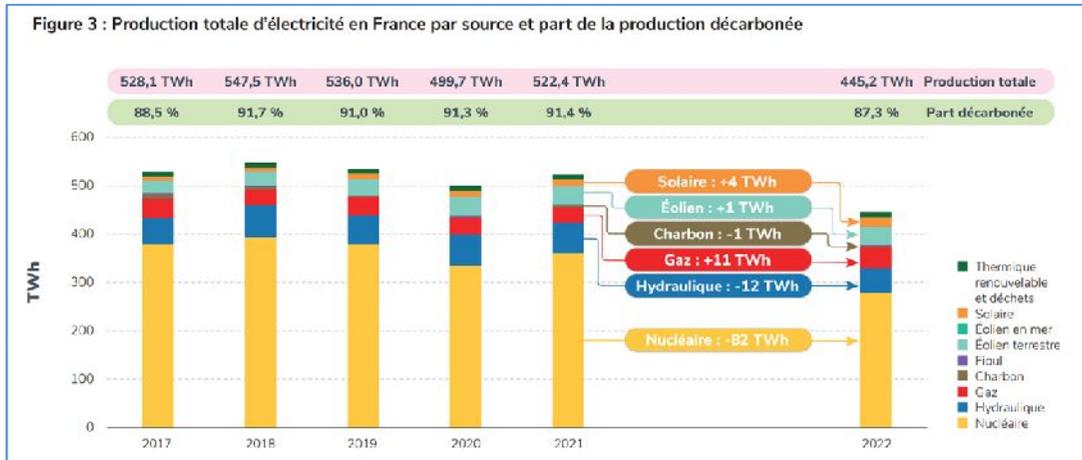
RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN FRANCE
Total : 2 571 TWh en 2020 (données non corrigées des variations climatiques)
En % (données non corrigées des variations climatiques)



~13% EnR dans notre consommation

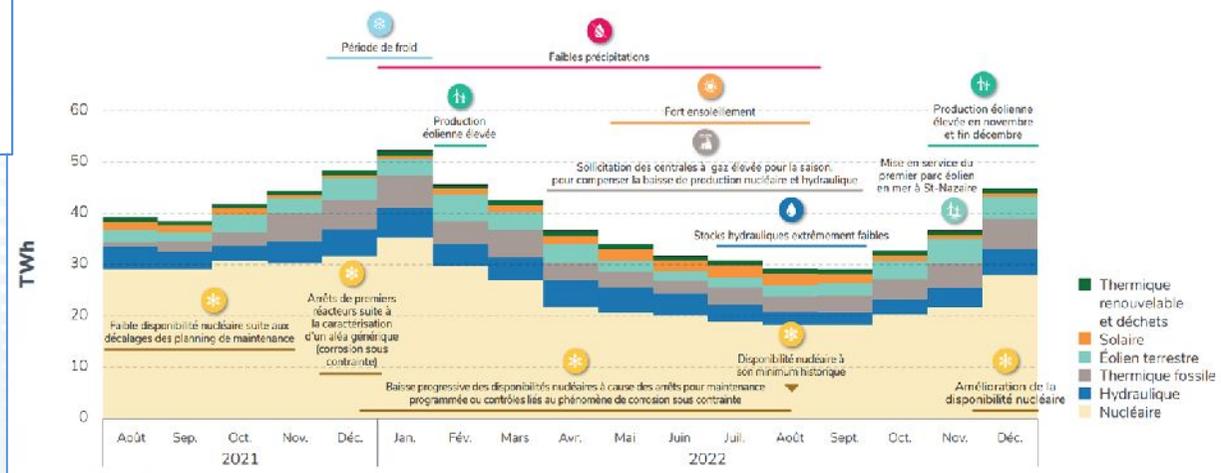
Énergies renouvelables électriques

- Une variabilité de la production totale
 - Aléas climatiques, pannes techniques = une diversification nécessaire



Une diversité nécessaire pour garantir la production contre les aléas

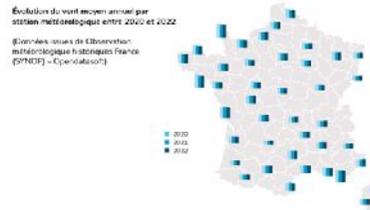
Figure 4 : Évolution de la production d'électricité en France par filière entre août 2021 et décembre 2022



Énergies renouvelables

• Éolien

– Un potentiel inégal sur le territoire



Installé



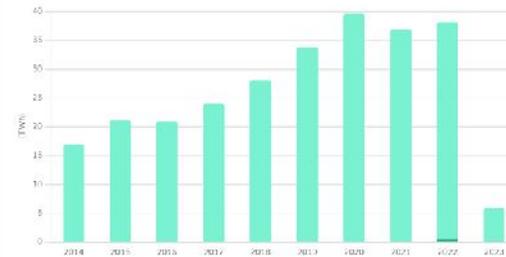
produit



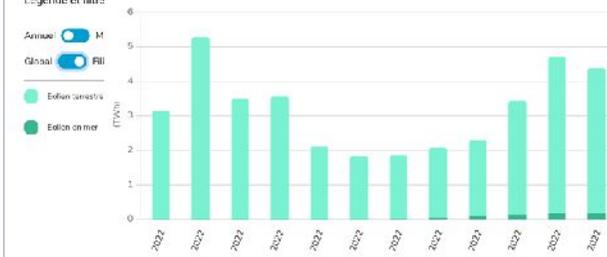
– Une production en stagnation

- (2022: 38,1 TWh)
- 2022 : Arrivée de l'éolien en mer
- Variabilité saisonnière

Evolution de la production éolienne

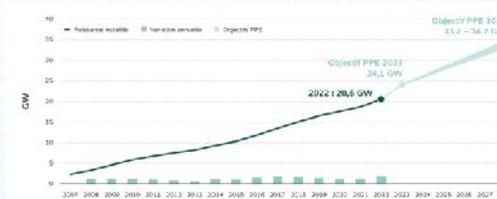


Évolution de la production éolienne



– Un objectif RTE horizon 2050 entre entre 43 GW et 74 GW (2022: 20,6 GW) **x 2-4**

Evolution du parc éolien terrestre (puissance installée totale et incréments annuels), et comparaison avec les objectifs publics



2050

Énergies renouvelables électriques

- **Solaire**

- Un potentiel inégal sur le territoire

Installé



Solaire photovoltaïque - puissance installée par région en 2019
 Source RTE - État 31 décembre 2019

produit

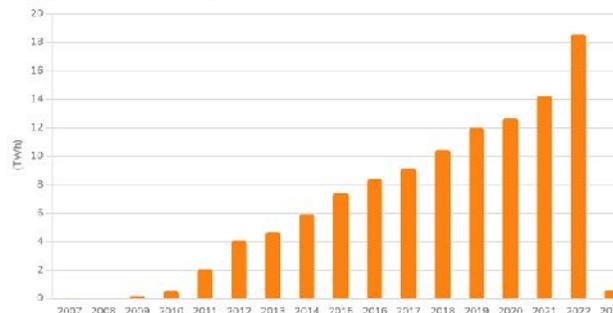


Solaire photovoltaïque - production par région en 2019
 Source RTE - État 31 décembre 2019

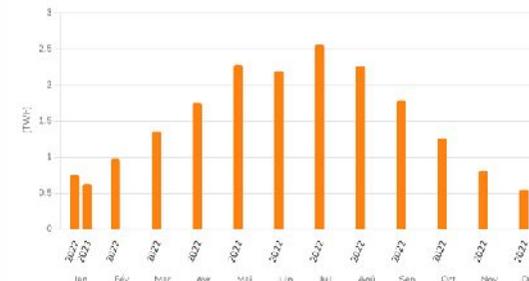
- Une production en forte hausse

- (2022: 18,6 TWh)
- Variabilité saisonnière

Evolution de la production solaire

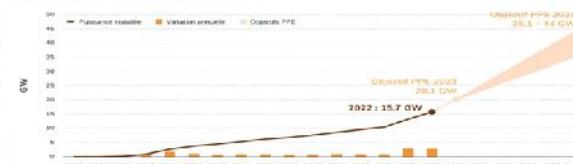


Evolution de la production solaire



- Un objectif RTE horizon entre entre 70 GW et 214 GW (2022: 15,7 GW) **x10**

Evolution annuelle du parc solaire photovoltaïque



2050

Énergies renouvelables

- **Bioénergie**

(production thermique)

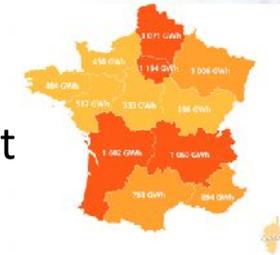
- Un potentiel inégal sur le territoire

Installé



Bioénergies : puissance raccordée par région en 2019
Source RTE - bilan électrique 2019

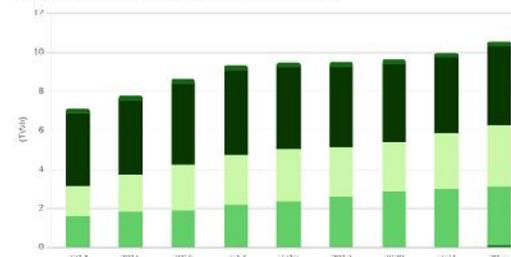
produit



Bioénergies : production par région en 2019
Source RTE - bilan électrique 2019

- Une production en légère augmentation (2022 : 10,6 TWh)

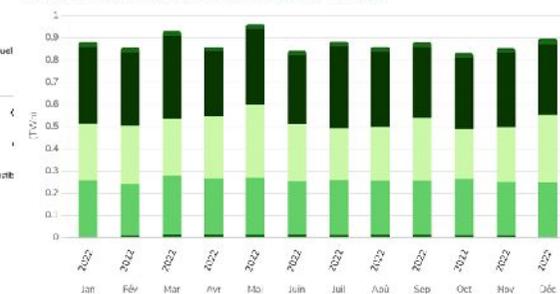
Evolution de la production thermique renouvelable et déchets



Légende et filtres

- Annuel Mensuel
- GWh/a Filtrer
- Déchets domestiques
- Bois - bois énergie
- Biomasse et combustibles
- Bogues
- Autres

Evolution de la production thermique renouvelable et déchets



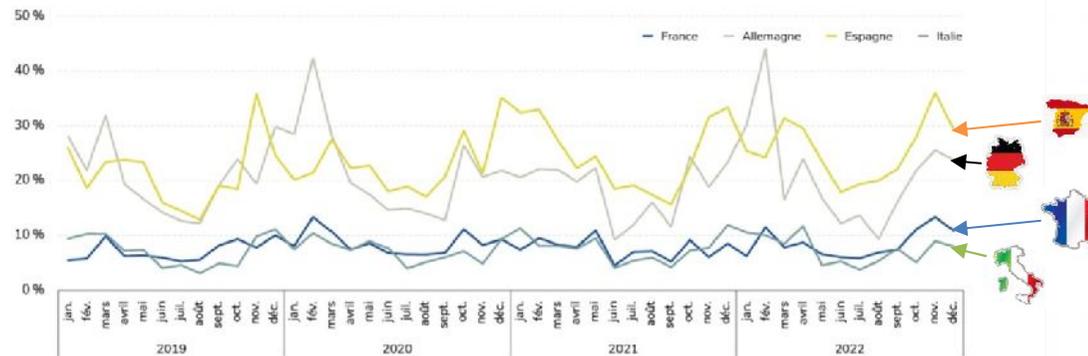
- Pas d'évolution des ~2 GW installés dans les scénarios RTE

Comparaison d'autres pays

- Étant donné la part importante du nucléaire en France, les parts de consommation couvertes par les EnR sont bien plus faibles que dans des pays comparables

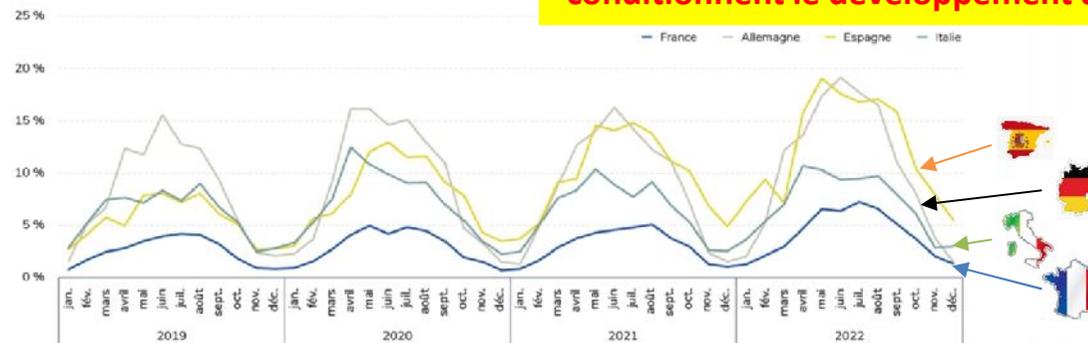
Éolien

Part de la consommation couverte par l'éolien terrestre dans une sélection de pays européens, moyenne mensuelle (Source : ENTSO-E)



Solaire

Part de la consommation couverte par le solaire photovoltaïque dans une sélection de pays européens, moyenne mensuelle (Source : ENTSO-E)

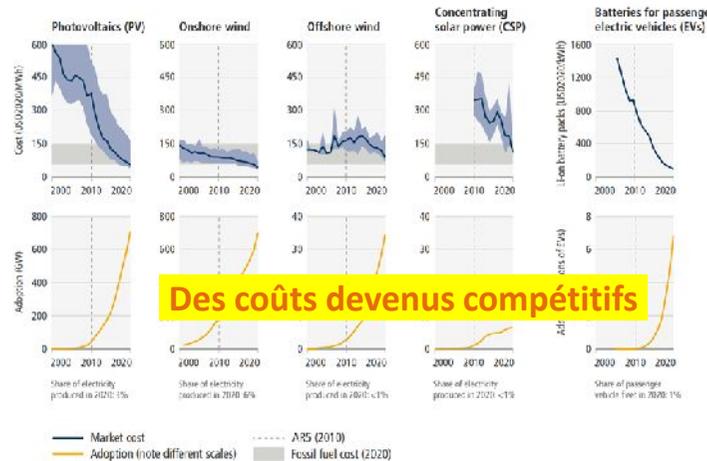


Les stratégies énergétiques des pays conditionnent le développement des EnR

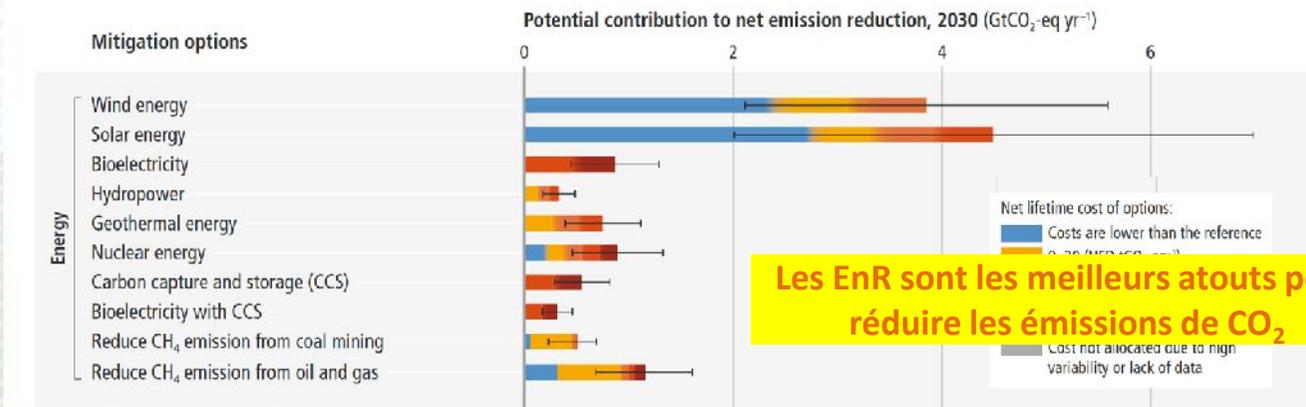
Les EnR sont pertinentes

- **Coûts compétitifs**

The unit costs of some forms of **renewable** energy and of batteries for passenger EVs have fallen, and their use continues to rise.



- **Contribution des EnR à la réduction des émissions de CO₂**



Les EnR ont leurs limites

- Les énergies renouvelables sont indispensables
 ... mais ne peuvent pas remplacer les énergies fossiles
- Des ressources minières limitées
 - Une grande partie des minerais vont s'épuiser



maintenant

2050

2100



- Les relocalisations sont contestées

Reportage – Mines et métaux

Mine de lithium dans l'Allier, les habitants en colère



Les EnR ont leurs limites

- Les énergies renouvelables sont indispensables
... mais ne peuvent pas remplacer les énergies fossiles

– Des espaces limités

» Ex. Calculs préliminaires Hydrogène présentés au CESER region Normandie mars 2021

L'hydrogène pour des secteurs difficilement électrifiables : aviation internationale, transport maritime, transport de marchandises



éoliennes
photovoltaïque
C'est toujours gigantesque !

@Mireille Bruyères, Julian Carrey, Mickaël Coriat,
Julie Rischawy, Florian Simatos (Atecopol 2021)

D'autres chiffres

- **Les usages**

- 40% voiture électrique en 2035 (15,6 M de voiture électrique)
 - $15\,600\,000 \times 15\,000 \text{ km/an} \times 17 \text{ kW}/100\text{km} = 2\,500 \text{ kWh / an} = 39,78 \text{ TWh}$ soit ~10% de la production électricité par an en moyenne (jusqu'à 26% en pic si tout le monde recharge en même temps)

- **Facteurs de charge**

- **Éolien**

- RTE bilan 2022, « En 2022, les conditions météorologiques n'ont pas été favorables à la production éolienne : le facteur de charge pour l'éolien terrestre s'est établi à 21,6 %, contre 23,2 % en 2021 et 26,6 % en 2020. »
 - Facteur de charge éolien en mer estimé à >40% sur la base des 0,5 GW installés en 2022)
 - Mais en général une éolienne tourne entre 50-80% du temps annuel sous conditions de vents plus ou moins fortes
 - En moyenne sur l'année, le taux de charge = la production annuelle en kWh divisé par la puissance installé.
 - » *éoliennes terrestres 20 GW produisent 38,1 TWh / an $\rightarrow 38100/20 = 1905 \text{ h/an} \rightarrow \text{facteur de charge } 1905 \text{ h} / (8760 \text{ h/an}) = 21,6\%$*
 - chiffres RTE 2022 (<https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-production#Vuedensemble>) pour le calcul : production totale éolienne France 38.1 TWh pour une puissance installée de « La puissance du parc éolien terrestre est passée de 18,7 GW au 31 décembre 2021 à 20,6 GW au 31 décembre 2022). Les 21.6% de taux de charge prennent une puissance moyenne de 20 GW terrestre sur l'année 2022.

- **Solaire**

- RTE bilan 2022 précise « facteur de charge, qui s'est établi à 14,6 % en 2022, en hausse par rapport au 13,8% de 2021 »

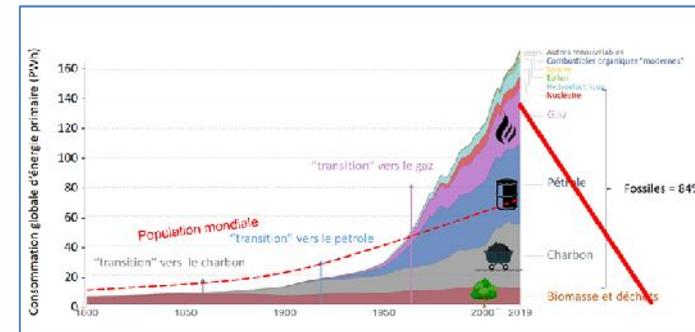
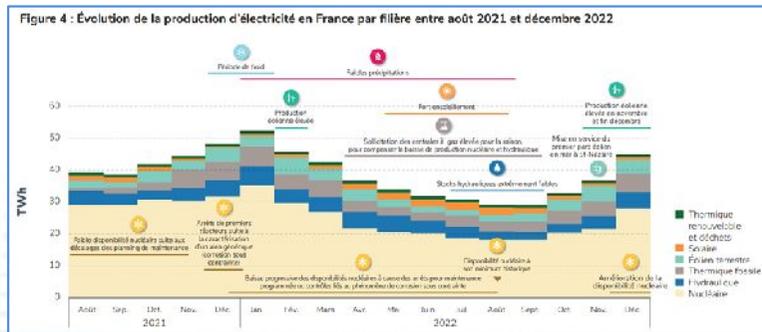
- **Hydraulique,**

- RTE bilan 2022 ne calcule pas de facteur de charge mais on calcule facilement 21,7% (env. 26 GW installés. 49.6 TWh produit (le plus bas depuis 1976 cause sécheresse).

- **Nucléaire facteur de charge :**

- sur les centrales en fonctionnement (34,1 GW) env. 93% (279 TWh produits)
- sur toutes les centrales installées (61,4 GW = fonctionnement et à l'arrêt) env. 51.8% (279 TWh produits).

- ✓ L'énergie est tjs empreinte de variabilité = diversification nécessaire
- ✓ Le mythe de la transition énergétique incite à la sobriété



Quels scénarios pour l'énergie dans le futur ?

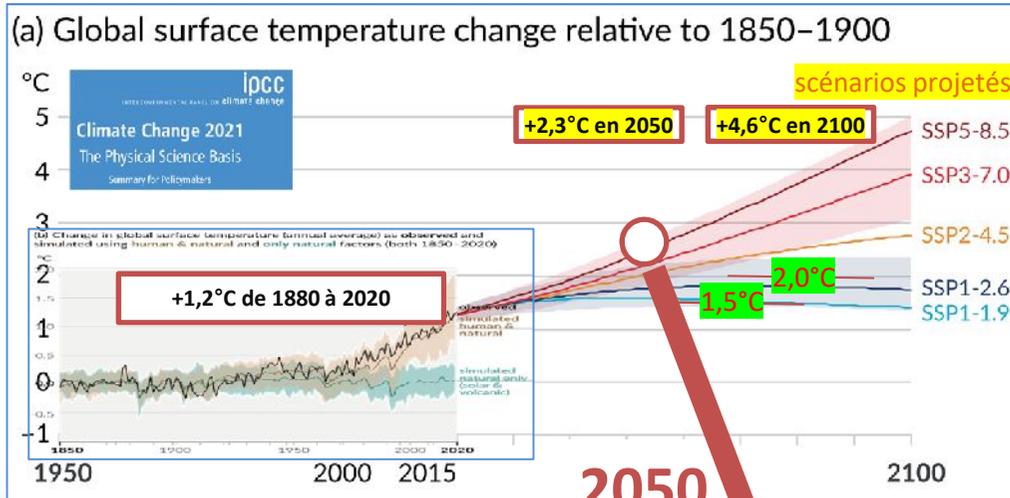
Dérèglement climatique

- Le pire est possible !

SSP5 – 8.5 : Le scénario business as usual

Global

+76% énergie totale consommée



SSP5-8.5 : Croissance et combustibles fossiles

SSP3-7.0 : Rivalité régionales

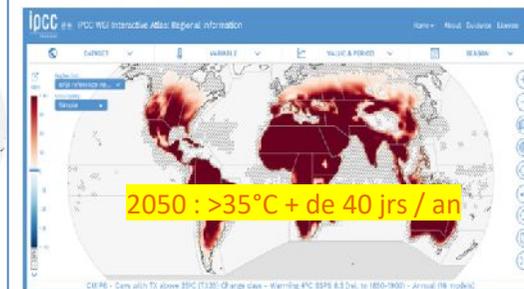
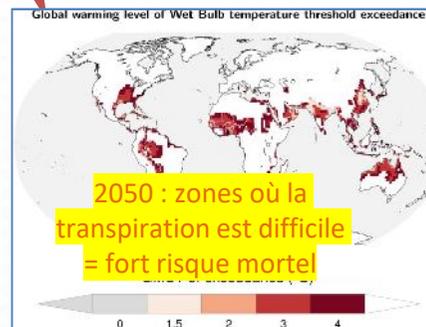
SSP2-4.5 : Au milieu du gué

SSP1-2.6 : Soutenabilité - sobriété

SSP1-1.9 : Soutenabilité - sobriété

© GIEC :
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

Un monde à peine viable

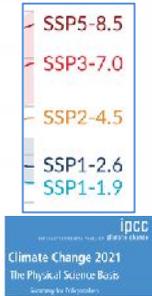


Agence européenne de l'environnement :

<https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020-executive-summary>

Déréglement climatique

• Des conséquences en Occitanie

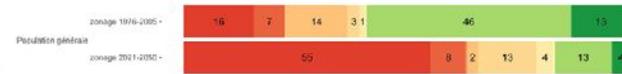


CROCC = "GIEC local"

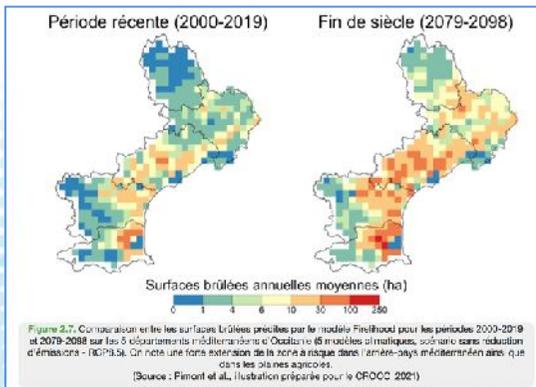
Référence 2001-2020	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
2041-2060	0,5 (0,3 à 1,0)	1,0 (0,6 à 1,3)	1,4 (1,3 à 1,8)
2081-2100	0,5 (0,2 à 0,8)	1,6 (1,3 à 2,0)	3,8 (3,5 à 4,2)

Table 1.C. Réchauffement de la température annuelle moyenne en Occitanie (°C) par rapport à 2001-2020 pour les trois scénarios considérés dans DRIAS 2020 pour le milieu et la fin de siècle. Le réchauffement moyen fourni par l'ensemble des scénarios est de 1,6°C, suivi de la plage probable (entre parenthèses). Le réchauffement est **Plus chaud** en ajoutant le réchauffement entre 1901-1920 (0,5°C).

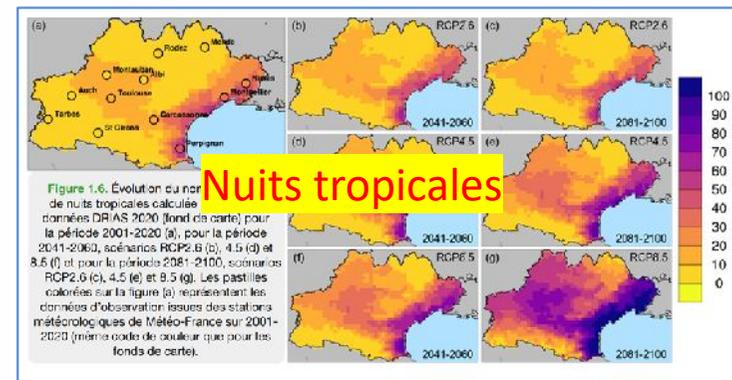
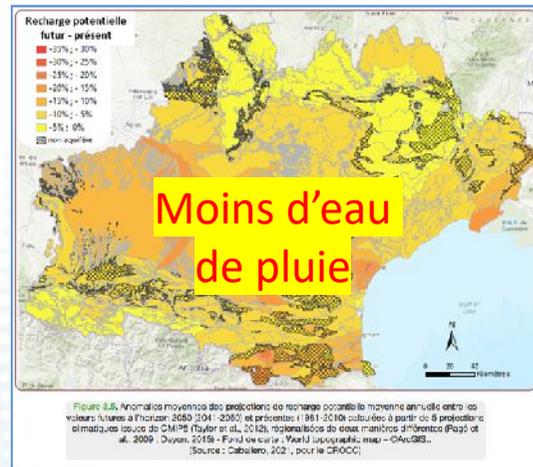
NB : La plage « probable » (au sens de la terminologie du GIEC) est un intervalle dans lequel une variable estimée a deux chances sur trois de se situer.



Plus d'habitants concernées



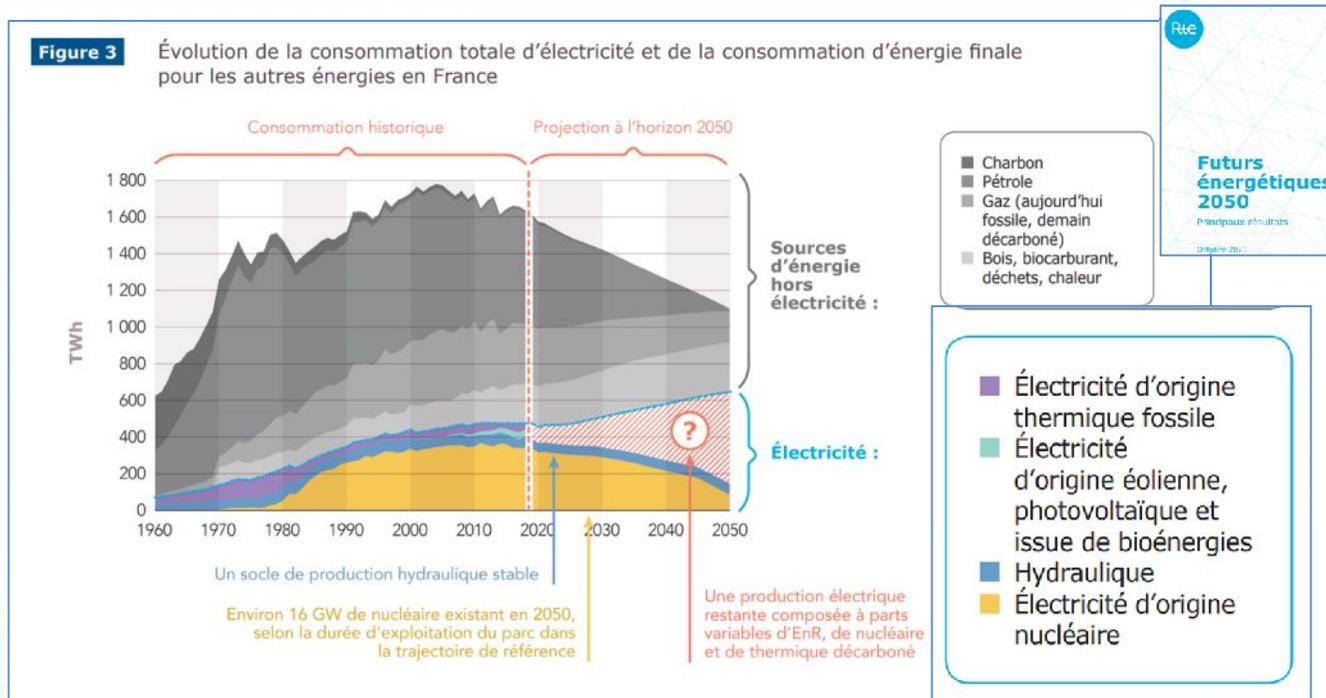
Plus de feux et moins de biodiversité



- Plus de risques d'inondation
- Impacts santé
- Etc...

Évolution globale

- France: Limiter à 1,5°C → SNBC → une décarbonation de l'énergie

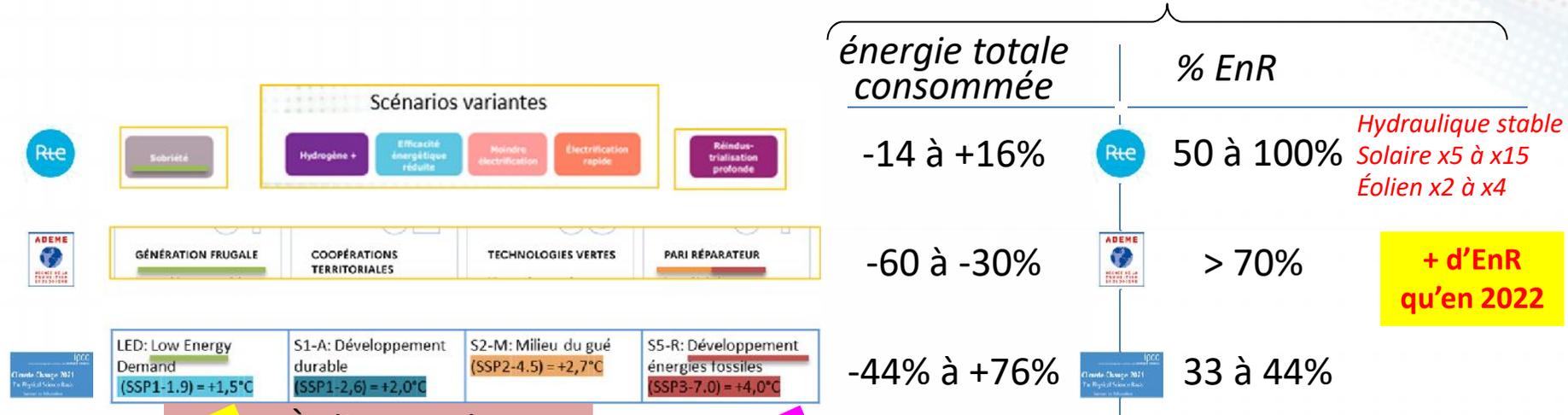


- Un report massif vers l'électricité,
- Une électricité avec beaucoup plus d'EnR qu'aujourd'hui
- Vers la sobriété et l'efficacité
- Des modes de vie bouleversés

Scénarios socio-économiques prospectifs

- Monde (GIEC)  / France () / France focus énergie ()

selon scénarios



À préférer ! À discuter !

À éviter !

Sobriété

Efficacité

Pertinence de 'croissance verte' ?



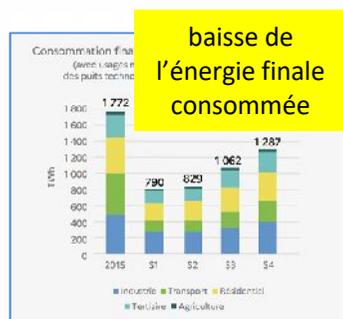
Le pb du stockage et capture de CO₂ industriellement non mature

Monde invivable

- ✓ nécessité de produire plus d'EnR !
- ✓ nécessité de réduire consommation d'énergie !
- ✓ nécessité de modifier nos modes de vies !

Scénarios prospectifs – ADEME

- ADEME : 4 scénarios pour la société française en 2050



> 70% d'EnR pour tous les scénarios

GÉNÉRATION FRUGALE
La transition est conduite principalement par la contrainte et par la sobriété.

COOPÉRATIONS TERRITORIALES
La société se transforme dans le cadre d'une gouvernance partagée.

TECHNOLOGIES VERTES
L'innovation est mise au service de systèmes énergétiques décarbonés.

PARI RÉPARATEUR
La société place sa confiance dans la capacité à réparer, les systèmes sociaux et écologiques.

- Démarche

- Hyp. : démographie stabilisé, évolution climat selon accord de Paris (neutralité 2050), prix énergie +30% en 2050, croissance économique 1,3%
- Calcul de bilans et d'allocation d'activités par année sous contraintes neutralité carbone

- Échelle micro : modes de vies

- habitat, mobilité, alimentation, type de société (*frugalité* | *partage* | *innovation verte* | *consumérisme*)

- Échelle méso : techniques, gouvernances, territoires

- Techniques (*lowtech* | *efficacité* | *décarbonation* | *innovation, captage CO₂*), gouvernances (*local* | *plannification énergétique centralisée*), territoire (*plus de rural* | *Villes moyennes* | *Villes moyennes* | *Plus de métropoles*)

- Échelle macro : économie et industrie

- Macroéconomie (*réduction des inégalités et local* | *réindustrialisation* | *croissance verte* | *énergies fossiles et mondialisation*)

Scénarios prospectifs – ADEME

LA SOCIÉTÉ EN 2050



S1 GÉNÉRATION FRUGALE



S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES



S3 TECHNOLOGIES VERTES



S4 PARI RÉPARATEUR

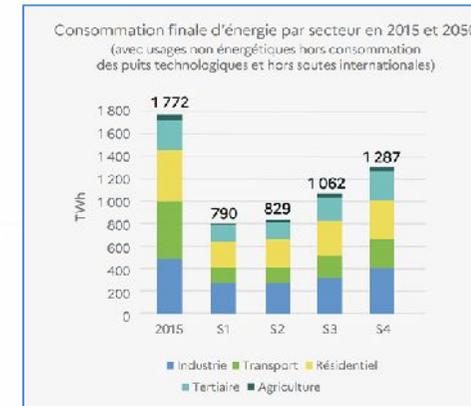
	S1 GÉNÉRATION FRUGALE	S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES	S3 TECHNOLOGIES VERTES	S4 PARI RÉPARATEUR		
MODES DE VIE	Société <ul style="list-style-type: none"> Recherche de sens Frugalité choisie mais aussi contrainte Préférence pour le local Nature sanctuarisée 	<ul style="list-style-type: none"> Évolution soutenable des modes de vie Économie du partage Équité Préservation de la nature inscrite dans le droit 	<ul style="list-style-type: none"> Plus de nouvelles technologies que de sobriété Consumérisme « vert » au profit des populations solvables, société connectée Les services rendus par la nature sont optimisés 	<ul style="list-style-type: none"> Sauvegarde des modes de vie de consommation de masse La nature est une ressource à exploiter Confiance dans la capacité à réparer les dégâts causés aux écosystèmes 	Société	
	Alimentation <ul style="list-style-type: none"> Division par 3 de la consommation de viande Part du bio: 70 % 	<ul style="list-style-type: none"> Division par 2 de la consommation de viande Part du bio: 50 % 	<ul style="list-style-type: none"> Baisse de 30 % de la consommation de viande Part du bio: 30 % 	<ul style="list-style-type: none"> Consommation de viande quasi-stable (baisse de 10 %), complétée par des protéines de synthèse ou végétales 	Alimentation	
	Habitat <ul style="list-style-type: none"> Rénovation massive et rapide Limitation forte de la construction neuve (transformation de logements vacants et résidences secondaires en résidences principales) 	<ul style="list-style-type: none"> Rénovation massive, évolutions graduelles mais profondes des modes de vie (cohabitation plus développée et adaptation de la taille des logements à celle des ménages) 	<ul style="list-style-type: none"> Déconstruction-reconstruction à grande échelle de logements Ensemble des logements rénovés mais de façon peu performante: la moitié seulement au niveau Bâtiment Basse Consommation (BBC) 	<ul style="list-style-type: none"> Maintien de la construction neuve La moitié des logements seulement est rénovée au niveau BBC Les équipements se multiplient, alliant innovations technologiques et efficacité énergétique 	Habitat	
	Mobilité des personnes <ul style="list-style-type: none"> Réduction forte de la mobilité Réduction d'un tiers des km parcourus par personne La moitié des trajets à pied ou à vélo 	<ul style="list-style-type: none"> Mobilité maîtrisée - 17 % de km parcourus par personne Près de la moitié des trajets à pied ou à vélo 	<ul style="list-style-type: none"> Mobilités accompagnées par l'État pour les maîtriser : infrastructures, télétravail massif, covoiturage + 13 % de km parcourus par personne 30 % des trajets à pied ou à vélo 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation forte des mobilités + 28 % de km parcourus par personne Recherche de vitesse 20 % des trajets à pied ou à vélo 	Mobilité des personnes	
	Technique Rapport au progrès, numérique, R&D	<ul style="list-style-type: none"> Innovation autant organisationnelle que technique Règne des low-tech, réutilisation et réparation Numerique collaboratif Consommation des data centers stable grâce à la stabilisation des flux 	<ul style="list-style-type: none"> Investissement massif (efficacité énergétique, ENR et infrastructures) Numerique au service du développement territorial Consommation des data centers stable grâce à la stabilisation des flux 	<ul style="list-style-type: none"> Ciblage sur les technologies les plus compétitives pour décarboner Numerique au service de l'optimisation Les data centers consomment 10 fois plus d'énergie qu'en 2020 	<ul style="list-style-type: none"> Innovations tout azimut Captage, stockage ou usage du carbone capté indispensable Internet des objets et intelligence artificielle omniprésents : les data centers consomment 15 fois plus d'énergie qu'en 2020 	Technique Rapport au progrès, numérique, R&D
	Gouvernance Échelles de décision, coopération internationale	<ul style="list-style-type: none"> Décision locale, faible coopération internationale Réglementation, interdiction et rationnement via des quotas 	<ul style="list-style-type: none"> Gouvernance partagée Fiscalité environnementale et redistribution Décisions nationales et coopération européenne 	<ul style="list-style-type: none"> Cadre de régulation minimale pour les acteurs privés État planificateur Fiscalité carbone ciblée 	<ul style="list-style-type: none"> Soutien de l'offre Coopération internationale forte et ciblée sur quelques filières clés Planification centralisée du système énergétique 	Gouvernance Échelles de décision, coopération internationale
	Territoire Rapport espaces ruraux – urbains, artificialisation	<ul style="list-style-type: none"> Rôle important du territoire pour les ressources et l'action « Démétropolisation » en faveur des villes moyennes et des zones rurales 	<ul style="list-style-type: none"> Reconquête démographique des villes moyennes Coopération entre territoires Planification énergétique territoriale et politiques foncières 	<ul style="list-style-type: none"> Métropolisation, mise en concurrence des territoires, villes fonctionnelles 	<ul style="list-style-type: none"> Faible dimension territoriale, étalement urbain, agriculture intensive 	Territoire Rapport espaces ruraux – urbains, artificialisation
ÉCONOMIE	Macro-économie <ul style="list-style-type: none"> Nouveaux indicateurs de prospérité (écarts de revenus, qualité de la vie...) Commerce international contracté 	<ul style="list-style-type: none"> Croissance qualitative, « réindustrialisation » de secteurs clés en lien avec territoires Commerce international régulé 	<ul style="list-style-type: none"> Croissance verte, innovation poussée par la technologie Spécialisation régionale Concurrence internationale et échanges mondialisés 	<ul style="list-style-type: none"> Croissance économique carbonée Fiscalité carbone minimaliste et ciblée Économie mondialisée 	Macro-économie	
	Industrie <ul style="list-style-type: none"> Production au plus près des besoins 70 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> Production en valeur plutôt qu'en volume Dynamisme des marchés locaux 80 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> Décarbonation de l'énergie 60 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> Décarbonation de l'industrie pariant sur le captage et stockage géologique de CO₂ 45 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage 	Industrie	

Scénarios prospectifs – ADEME

- ADEME



– Tous les scénarios ADEME montrent une baisse de l'énergie finale consommée



– Au moins 70% d'EnR pour tous les scénarios

Tableau 2 Part d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie

	2030	2050
TEND	26 %	43 %
S1	34 %	86 %
S2	32 %	86 %
S3	33 %	81 à 87 %***
S4	29 %	70 %
Obj. LTECV*	32 %	-
Obj. LEC** 2019	33 %	-

* Objectifs inscrits dans la loi de Transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 17 août 2015.

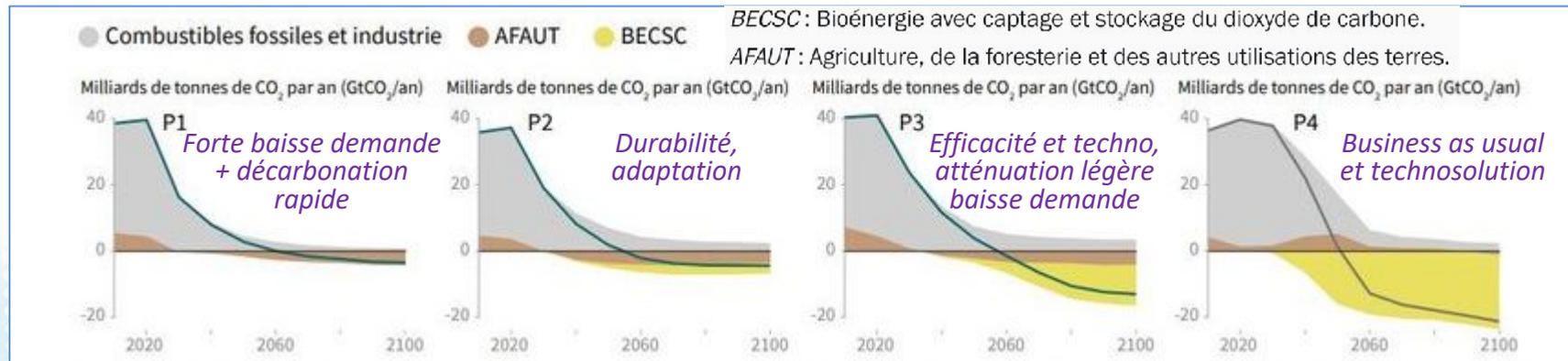
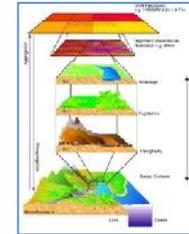
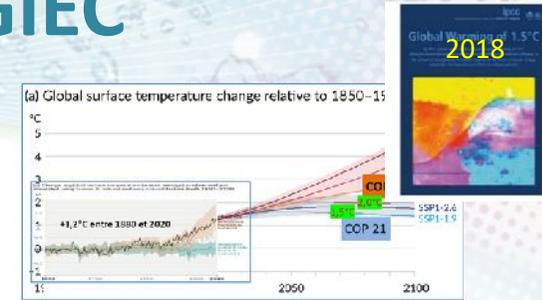
** Objectifs inscrits dans la loi Énergie-Climat (LEC) du 8 novembre 2019.

*** Valeurs dépendant des choix de politiques industrielles de développement des filières éolien flottant ou nucléaire.

Scénarios prospectifs – GIEC

- **2018 : 4 scénarios du GIEC**

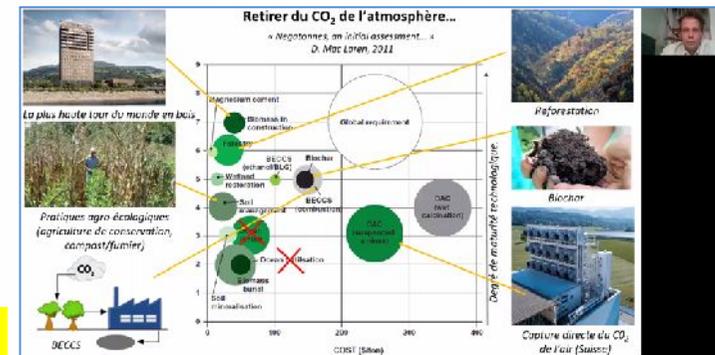
- Hyp. Limiter à 1,5°C (COP21) = neutralité carbone 2050
 - » NB : COP 27 a déjà réévalué la tendance à +2,0°C
- Modèles climatiques multiéchelles



- Très forte réduction des énergies fossiles (P1 à P4) + bcp de stockage et capture de CO₂ (P2 à P4)

» NB : Stockage et capture de CO₂ : technologie non mature pas à la hauteur des quantités prévues dans les scénarios

Le pb du stockage et capture de CO₂



Scénarios prospectifs – GIEC



• 2021 : 5 trajectoires socio-économiques (SSP) du GIEC

SSP1 : **Soutenabilité – La voie verte** Nécessite une forte capacité d'adaptation / des efforts

C'est le scénario d'un **développement plus inclusif qui respecte les limites environnementales planétaires et s'articule autour du bien-être des populations et de la réduction des inégalités**. La consommation est orientée vers une **faible croissance matérielle**, une **moindre utilisation de ressources et d'énergie**. Les deux premiers scénarios du Giec (SSP1-1.9 et SSP1-2.6) se basent sur ce récit.

SSP2 : **Au milieu du gué** Nécessite une capacité moyenne d'adaptation

Notre **monde poursuit ses tendances historiques** avec une croissance inégalement répartie des revenus et opère lentement sa transition écologique, malgré les objectifs qu'il se donne. La transition démographique est achevée dans la seconde moitié du XXIème siècle. C'est **le scénario médian (SSP2-4.5)** utilisé par le Giec.

SSP3 **Rivalités régionales – Un chemin escarpé** Nécessite peu d'efforts / faible capacité d'adaptation

La **résurgence du nationalisme**, les préoccupations en matière de compétitivité et de sécurité et les **conflits régionaux** poussent les pays à se concentrer de plus en plus sur les questions nationales ou, tout au plus, régionales, **au détriment de la réduction des inégalités et de la prise en compte des questions environnementales**. Correspond au **quatrième scénario (SSP3-7.0)** du Giec.

SSP4 **Inégalités – Une route divisée**

Le scénario d'inégalités exacerbées entre une société très connectée au niveau international qui contribue à un fort développement économique adossé à toutes les sources d'énergie, et des sociétés à faibles revenus, peu éduquées et cantonnées à des activités à faible valeur ajoutée. La fracture s'exacerbe et les conflits et troubles deviennent fréquents. Le Giec n'a pas envisagé ce scénario dans son rapport.

SSP5 **Développement alimenté par des combustibles fossiles – L'autoroute** Nécessite une forte capacité d'adaptation / des efforts

Le scénario d'un **développement économique et social élevé basé sur les marchés compétitifs et l'innovation** qui nécessite de recourir à **d'abondantes ressources en énergies fossiles**. Correspond au **scénario le plus pessimiste du Giec (SSP5-8.5)**

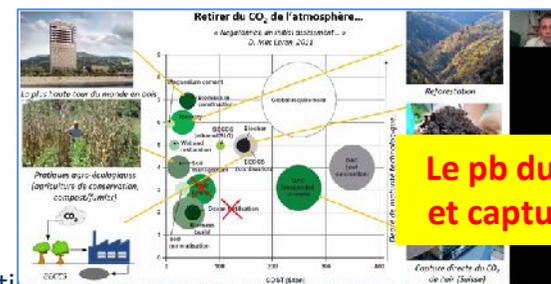
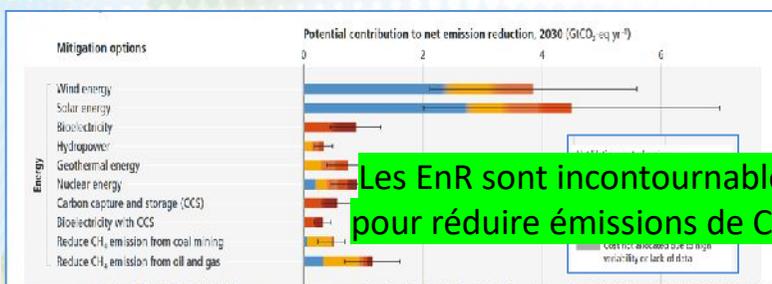
Scénarios prospectifs – GIEC



• 2021 : 4 scénarios du GIEC en appuis des 5 trajectoires socioéconomiques

<p>SSP5-8.5</p> <p>S5-R: Développement énergies fossiles (SSP3-7.0) = +4,0°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> Faible croissance démographique. Forte croissance de l'utilisation de l'énergie et des ressources. Transition énergétique retardée par une forte innovation et l'adoption à grande échelle de technologies à émissions négatives. Régimes alimentaires comportant une part élevée d'animaux et une quantité importante de déchets. 	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des émissions CO₂ (2020–2040): 3.8%/an (lente décarbonation) Usage énergie (2020–2100): +76% Stockage et capture CO₂ BECCS (2020–2100): 1190 GtCO₂ Répartition énergie finale (2020–2100): Renouvelables : 37.6% — Nucléaire : 8.4% — Fossiles : 31.3% — Bioénergie: 22.8%
<p>SSP2-4.5</p> <p>S2-M: Milieu du gué (SSP2-4.5) = +2,7°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> Croissance démographique modérée. Croissance modérée de l'utilisation de l'énergie et des matériaux. Changements institutionnels et comportementaux progressifs et innovation technologique plus lente. Poursuite des tendances historiques en matière de transition alimentaire. 	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des émissions CO₂ (2020–2040): 5.0%/an (décarbonation modérée) Usage énergie(2020–2100): +40% Stockage et capture CO₂ BECCS (2020–2100): 415 GtCO₂ Répartition énergie finale (2020–2100): Renouvelables : 33.7% — Nucléaire : 13.1% — Fossil fuels: 36.2% — Bioénergie: 16.9%
<p>SSP1-2.6</p> <p>S1-A: Développement durable (SSP1-2,6) = +2,0°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> Faible croissance démographique. Consommation d'énergie stable et croissance lente des matériaux. Forte innovation et adoption rapide de technologies durables qui améliorent l'efficacité énergétique. Convergence vers des régimes alimentaires à faible taux de déchets et à faible part d'animaux. 	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des émissions CO₂ (2020–2040): 5.5%/an (décarbonation rapide) Usage énergie(2020–2100): -7% Stockage et capture CO₂ BECCS (2020–2100): 150 GtCO₂ Répartition énergie finale (2020–2100): Renouvelables : 44.1% — Nucléaire : 5.6% — Fossiles: 39.9% — Bioénergie: 10.5%
<p>SSP1-1.9</p> <p>LED: Low Energy Demand (SSP1-1.9) = +1,5°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> Croissance démographique modérée. Diminution modérée de la consommation d'énergie et de matériaux. Forte innovation et adoption rapide de technologies durables. Convergence vers des régimes alimentaires durables et à faible teneur en carbone. 	<ul style="list-style-type: none"> Réduction des émissions CO₂ (2020–2040): 6.5%/an (décarbonation rapide) Usage énergie(2020–2100): -44% Stockage et capture CO₂ BECCS (2020–2100): 0 GtCO₂ Répartition énergie finale (2020–2100): Renouvelables: 42.8% — Nucléaire : 6.9% — Fossiles : 37.3% — Bioénergie: 12.9%

A éviter !



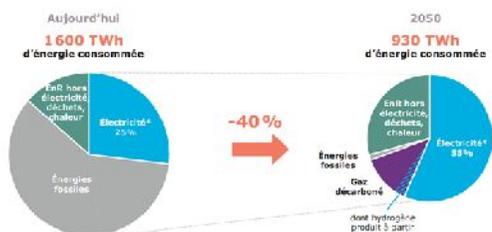
Scénarios prospectifs – RTE



- **Les futurs énergétiques 2050 de RTE**

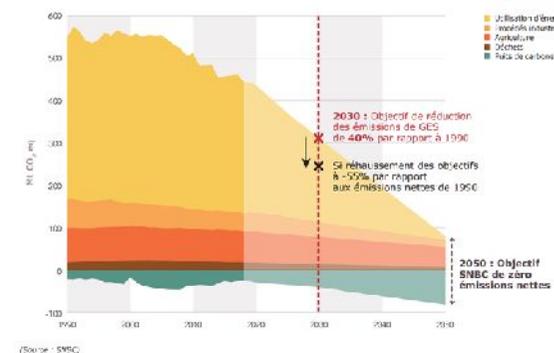
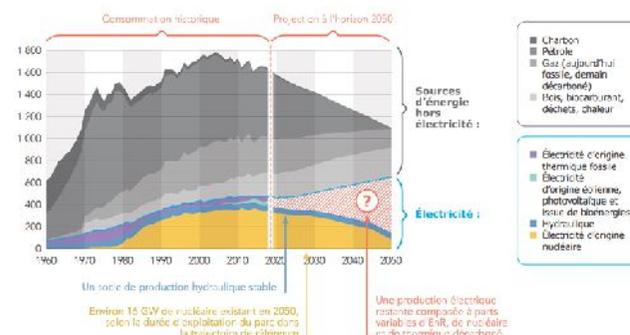
- Hypothèse : -40% énergie totale (SNBC) dont 645 TWh électrique pour atteindre neutralité carbone 2050

Figure 2 Consommation d'énergie finale en France et dans la SNBC



* Consommation finale d'électricité hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène
 Consommation finale d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh

Figure 3 Évolution de la consommation totale d'électricité et de la consommation d'énergie finale pour les autres énergies en France



- Cas de base : 645 TWh (= 930TWh * 0,55 + conso prod. H₂+ conso pour produire énergie)

- Méthode :

- calcul de bilans, d'allocation d'activité
 - Analyse économique (coût production + réseau + consommation)
 - Analyse environnementale (empreinte carbone, conso ressources, occupation sols, déchets, pollution de l'air)
 - Volet social (acceptabilité, sobriété, flexibilité)

Scénarios prospectifs – RTE

• Les futurs énergétiques 2050 de RTE

LES TRAJECTOIRES DE CONSOMMATION À L'HORIZON 2050

SCÉNARIOS	CONSUMMATION FINALE D'ÉLECTRICITÉ PAR SECTEUR :		
	Industrie	Résidentiel	Tertiaire Transport Hydrogène
SCÉNARIOS	NIVEAU 2050	PRINCIPALES ÉVOLUTIONS	
HYPOTHÈSES			
Référence	645 TWh	180 TWh	134 TWh
		113 TWh	99 TWh
		50 TWh	
Sobriété	555 TWh (-90 TWh)	160 TWh (-20 TWh)	111 TWh (-23 TWh)
		95 TWh (-18 TWh)	77 TWh (-22 TWh)
		47 TWh (-3 TWh)	
Réflexion utilisation profonde	752 TWh (+107 TWh)	239 TWh (+59 TWh)	134 TWh (0 TWh)
		115 TWh (+2 TWh)	99 TWh (0 TWh)
		87 TWh (+37 TWh)	
VARIANTES			
Électrification rapide	700 TWh (+55 TWh)	192 TWh (+12 TWh)	139 TWh (+5 TWh)
		120 TWh (+7 TWh)	123 TWh (+27 TWh)
		50 TWh (0 TWh)	
Moindre électrification	578 TWh (-67 TWh)	150 TWh (-30 TWh)	126 TWh (-8 TWh)
		107 TWh (-6 TWh)	81 TWh (-18 TWh)
		50 TWh (0 TWh)	
Efficacité électrique réduite	714 TWh (+69 TWh)	191 TWh (+11 TWh)	126 TWh (+22 TWh)
		135 TWh (+22 TWh)	105 TWh (+6 TWh)
		50 TWh (0 TWh)	
Hydrogène +	754 TWh (+109 TWh)	164 TWh (-16 TWh)	134 TWh (0 TWh)
		113 TWh (0 TWh)	93 TWh (-6 TWh)
		171 TWh (+121 TWh)	

LES SCÉNARIOS DE MIX DE PRODUCTION À L'HORIZON 2050

SCÉNARIOS	NARRATIF	RÉPARTITION DE LA PRODUCTION EN 2050	CAPACITÉS INSTALLÉES EN 2050 (EN GW)*					BOUQUET DE FLEXIBILITÉS EN 2050
			Solaire	Eolien terrestre	Eolien en mer	Hydroélectricité	Nouveau nucléaire	
M0 100% EnR 100% V2G	Sortie du nucléaire en 2050 : le déclassement des réacteurs nucléaires existants est accéléré, tandis que les rythmes de développement du photovoltaïque, de l'éolien et des énergies marines sont poussés à leur maximum.	100% EnR	208 GW (soit x21)	74 GW (soit x4)	62 GW	0 GW	0 GW	15 GW (1,1 MVE) 1,7 GW (1,1 MVE) 29 GW (1,1 MVE) 26 GW
M1 Répartition diffuse	Développement très important des énergies renouvelables réparties de manière diffuse sur le territoire national et en grande partie porté par la filière photovoltaïque. Cet essor sous-tend une mobilisation forte des acteurs locaux participatifs et des collectivités locales.	83% EnR	214 GW (soit x22)	59 GW (soit x3,5)	45 GW	16 GW	0 GW	17 GW (1,1 MVE) 1,7 GW (1,1 MVE) 20 GW (1,1 MVE) 21 GW
M2 EnR optimisés	Développement très important de toutes les filières renouvelables, porté notamment par l'installation de grands parcs éoliens sur terre et en mer. Logique d'optimisation économique et ciblage sur les technologies et les zones bénéficiant des meilleurs rendements et permettant des économies d'échelle.	83% EnR	125 GW (soit x12)	72 GW (soit x4)	60 GW	16 GW	0 GW	15 GW (1,1 MVE) 1,7 GW (1,1 MVE) 20 GW (1,1 MVE) 13 GW
N1 EnR + nouveau nucléaire 1	Lancement d'un programme de construction de nouveaux réacteurs, développés par paire sur des sites existants tous les 5 ans à partir de 2035. Développement des énergies renouvelables à un rythme soutenu afin de compenser le déclassement des réacteurs de deuxième génération.	88% EnR	118 GW (soit x11)	58 GW (soit x3,3)	45 GW	16 GW	13 GW (soit 8 EPR)	15 GW (1,1 MVE) 1,7 GW (1,1 MVE) 11 GW (1,1 MVE) 9 GW
N2 EnR + nouveau nucléaire 2	Lancement d'un programme plus rapide de construction de nouveaux réacteurs (une paire tous les 3 ans) à partir de 2035 avec montée en charge progressive. Le développement des énergies renouvelables se poursuit mais moins rapidement que dans les scénarios N1 et M.	83% EnR	90 GW (soit x8,5)	52 GW (soit x2,9)	36 GW	16 GW	23 GW (soit 14 EPR)	15 GW (1,1 MVE) 1,7 GW (1,1 MVE) 5 GW (1,1 MVE) 2 GW
N03 EnR + nouveau nucléaire 3	Le mix de production repose à part égale entre les énergies renouvelables et le nucléaire à l'horizon 2050. Cela implique d'exploiter le plus longtemps possible le parc nucléaire existant, et de développer de manière volontariste et diversifiée le nouveau nucléaire (EPR 2 + SMR).	88% EnR	70 GW (soit x7)	43 GW (soit x2,5)	22 GW	24 GW	~27 GW (soit ~14 EPR + quelques SMR)	11 GW (1,1 MVE) 1,7 GW (1,1 MVE) 1 GW
Hypothèses communes			Hydrolique ~22 GW	Énergies marines Entre 0 et 3 GW	Bioénergies ~2 GW	Imports 39 GW	STEP 8 GW	

*Les quantités et parts d'énergie sont exprimées par rapport au scénario de consommation de référence.



% EnR

100 %

87 %

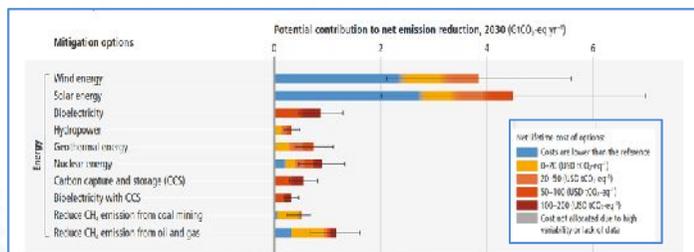
87 %

74 %

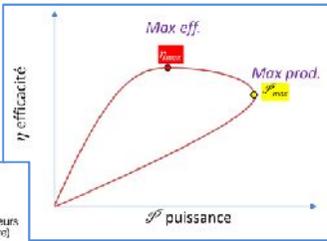
63 %

50 %

- ✓ Des EnR devenues incontournables pour réduire les émissions de CO₂
- ✓ De nouveaux modes de vies à explorer

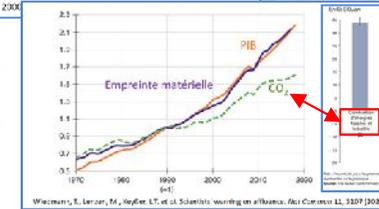
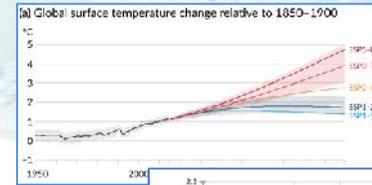


Conclusions



On a **besoin d'énergie** pour nos modes de vie

L'énergie fossile dérègle le climat



Le mythe de la **transition énergétique** incite à la **sobriété**

De **nouveaux modes de vies** à explorer



Des **EnR** devenues **incontournables** pour réduire les émissions de **CO₂**



01 GÉNÉRATION FRUGALE

La transition est conduite principalement par la contrainte et par la sobriété.

02 COOPÉRATIONS TERRITORIALES

La société se transforme dans le cadre d'une gouvernance partagée.

03 TECHNOLOGIES VERTES

L'innovation est mise au service de systèmes énergétiques décarbonés.

04 PARI RÉPARATEUR

La société abuse sa confiance et sa capacité à réparer les systèmes sociaux et écologiques.

